

黄土古土壤的抗剪强度特性

邓军涛^{1,2}, 张艳^{1,3}, 王娟娟¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 3. 陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: [目的] 对原状和扰动古土壤抗剪强度随含水量和干密度的变化进行研究, 为黄土地区的边坡工程、隧道工程以及地下建筑工程设计施工中参数的选取提供依据。[方法] 分别对相同干密度、不同含水量的原状样, 不同干密度、不同含水量的扰动样及与原状样相同干密度、相同含水量的扰动样进行室内直剪试验。[结果] 在干密度相同的条件下, 原状和扰动古土壤的黏聚力随含水量的增大而减小; 在同一含水量指标下, 原状古土壤的黏聚力大于扰动古土壤, 二者的内摩擦角亦随含水量的增大而减小。[结论] 黄土古土壤的抗剪强度指标随着含水量的增大而减小, 黏聚力与含水量呈指数函数关系, 内摩擦角与含水量呈二次抛物线关系。

关键词: 黄土; 古土壤; 含水量; 干密度; 抗剪强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0319-04

中图分类号: TU411.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.124

Shear Strength Characteristics of Loess Paleosol

DENG Juntao^{1,2}, ZHANG Yan^{1,3}, WANG Juanjuan¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an,

Shaanxi 710055, China; 2. China Jikan Geotechnical Institute of Engineering Investigation and Design,

Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 3. Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: [Objective] To study how shear strength change with the variation of water content and dry density in undisturbed and disturbed loess paleosol in order to provide the basis for selecting the parameters in design and construction of slope project, tunneling and underground structure engineering in loess area [Methods] Direct shear tests were conducted on undisturbed and disturbed paleosol with different water contents and dry densities. [Results] Under the same dry density, cohesion of both undisturbed and disturbed paleosol decreased with the increase of water content. While under the same moisture content, the cohesion of undisturbed paleosol was greater than the cohesion of disturbed paleosol. The internal friction angle increased with the increase of the water content. [Conclusion] The shear strength index of loess paleosol increases with the decrease of moisture content. An exponential relationship exists between cohesion and water content, and a quadratic parabola relationship exists between internal friction angle and water content.

Keywords: loess; paleosol; water content; dry density; shear strength

黄土高原的黄土层实际上是由不同类型古土壤层和黄土层构成的。黄土古土壤是在黄土风成堆积过程中, 在干湿交替气候条件下发育的土壤。工程实践资料表明古土壤层有完整的发育剖面, 以棕红色条带及钙质结核层出现在黄土剖面中^[1-3]。通过对黄土力学性质的研究发现, 古土壤的力学特性有异于黄土^[4-5], 目前对黄土古土壤强度的研究尚有一些不足。基于此, 本文主要研究黄土古土壤抗剪强度指标随含

水量、干密度的变化规律, 拟为黄土地区的边坡工程、隧道工程以及地下建筑工程设计施工中参数的选取提供依据。

1 试验概况

本次试验采样剖面处于关中平原的中南部, 黄土地层剖面出露清楚, 在黄土高原南部具有很好的代表性, 试验土样选取的是马兰黄土下伏的一层深红褐色

收稿日期: 2014-06-25

修回日期: 2014-08-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原旱区浅层土体水分场随气候变化机理及数值模拟”(51078309); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2012 KTCQ03-01); 陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0889); 国机集团科技发展资助项目(SINOMACH12 科 173 号)

第一作者: 邓军涛(1979—), 男(汉族), 湖北省仙桃市人, 博士研究生, 主要从事黄土地区工程地质、边坡工程、浅层地热能开发等方面的生产、科研工作。E-mail: djt4990322@163.com。

古土壤,厚 2.5~3.0 m,具明显菌丝和碎斑结构,古土壤底部为较连续分布的钙质结核层,其物理性质指标如表 1 所示。古土壤的塑性指数 $I_p = 15.4$,属于粉质黏土。

表 1 古土壤的物理性质指标

含水量/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	塑限/ %	液限/ %	比重	孔隙比
20.56	1.47	12.5	27.9	2.73	0.81

原状土初始含水率为 20.6%,采用自然风干法和滴水法配制了 19%,22%,25%,28%,31% 共 5 组不同含水率的原状样。重塑土样的制备是将试验土料过 0.5 mm 筛,搅拌均匀,配制成初始含水率为 16% 的土样,为了和原状样进行对比,控制其含水率与相应的原状样相同,干密度分别为 1.27,1.37,1.47,1.57 和 1.67 g/cm^3 。试验采用应变控制式直剪仪,取相同含水量的 4 个试样在 50,100,150 和 200 kPa 的垂直压力下直剪试验,手轮速率控制在 10~12 转/min,使土样在 3~5 min 内剪损,试样在各级压力下的抗剪强度取峰值强度,对无明显峰值者,取应力应变曲线上应变量为 4 mm 所对应的强度。

2 结果及分析

2.1 黄土古土壤抗剪强度指标与含水量的变化规律

黄土古土壤的原状土样在干密度为 1.47 g/cm^3 ,含水量不同的情况下抗剪强度指标与含水量的关系曲线如图 1 所示。

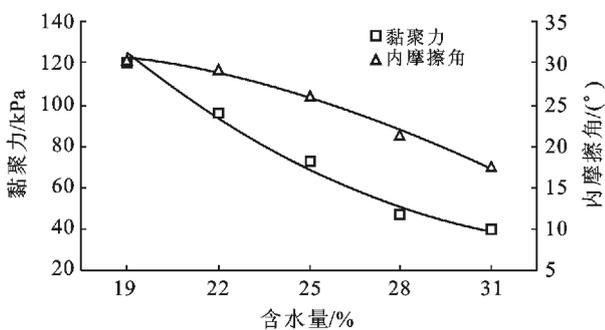


图 1 原状土样黏聚力、内摩擦角与含水量的关系

从图 1 中分析得知,在干密度相同的条件下,黄土古土壤原状土样的黏聚力随含水量增大而减小,且递减的趋势逐渐减小。内摩擦角随含水量的增加也是逐渐减小的,但变化幅度较小。引起这种变化的主要原因是由于水分在土壤中所起的润滑作用,及其对古土壤固化黏聚力的破坏作用。古土壤具有原始黏

聚力和固化黏聚力,前者是由于古土壤颗粒分子间的引力决定的,与古土壤的密度有关。试验土样没有改变其密度,只改变了含水量的大小,因此黏聚力发生的递减现象是由于固化黏聚力的减少而引起。固化黏聚力的大小决定于土壤颗粒之间胶结物质的胶结作用。土粒间通过黏土矿物、游离氧化物、碳酸盐和有机质等胶体而连结在一起,而这种胶结作用在含水量增加的情况下逐渐减弱从而引起固化黏聚力的减小,直至消失^[6-10]。当土颗粒中含水量较少时,土粒表面结合水膜较薄,颗粒间主要通过引力结合,相对错动困难,颗粒间摩擦力相对较大,土体结构强度稳定,颗粒排列随机性大,因此土体内摩擦角较大^[11-13]。

2.2 黄土古土壤抗剪强度与干密度的变化规律

在同一含水量下改变土样的干密度(1.27,1.37,1.47,1.57 和 1.67 g/cm^3),以此分析干密度对抗剪强度指标的影响(如图 2—3 所示)。

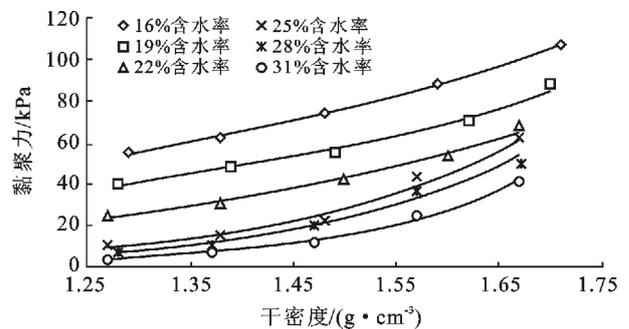


图 2 黏聚力与干密度的关系

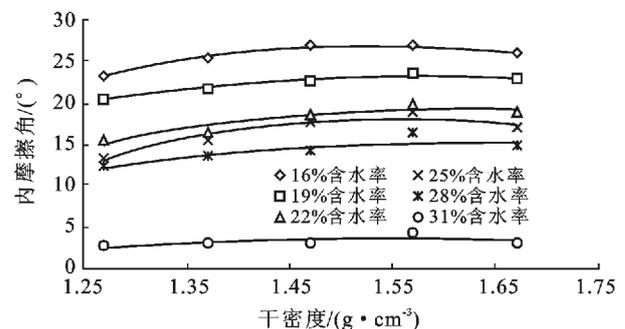


图 3 内摩擦角与干密度的关系曲线

从图 2—3 中可以看出,在同一含水量下土样的黏聚力随干密度的增大而增大,在含水量较大的情况下,增大幅度较大;随着土样含水量的增加在同一干密度下黏聚力逐渐减小,且干密度较大的情况下递减幅度较小。在含水量相同的条件下,土样内摩擦角随干密度的增大表现出先增大后减小的趋势,变化的区间较小;随着土样含水量的增加内摩擦角迅速减小,尤其当含水量达到 31% 时内摩擦角出现骤然减小。

2.3 原状土样与扰动土样抗剪强度对比分析

在相同干密度条件下,对黄土古土壤原状土样和扰动土样抗剪强度指标 c, φ 随含水量的变化规律进行对比分析得到图 4。

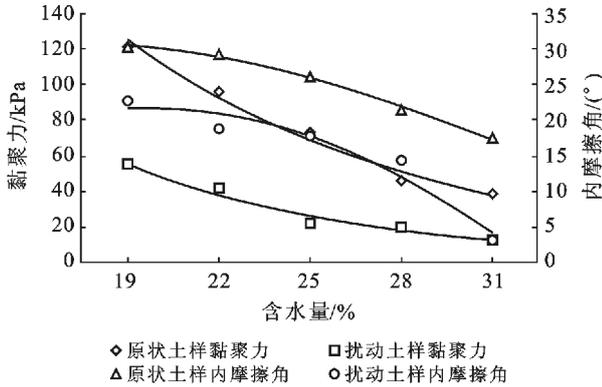


图 4 黏聚力、内摩擦角随含水量变化的拟合曲线

在相同干密度 1.47 g/cm^3 条件下黄土古土壤原状土样和扰动土样的黏聚力和内摩擦角均随含水量的增大而减小,并且原状土样的黏聚力、内摩擦角均大于扰动土样,原状土样黏聚力随含水量递减的趋势大于扰动土样。随含水量的增加,土样孔隙中的水分子量增加,引起了水膜的楔入作用,自由水分子较多,黏土矿物溶解流失,颗粒边角软化易滑动,导致黏聚力降低,颗粒之间摩擦力降低。黄土和古土壤承受了不同的成壤作用,古土壤含有较多的盐类,土颗粒被盐类以薄膜形态包围、胶结增大了古土壤的固化凝聚力。黄土古土壤在微湿和不扰动情况下,具有较高的强度。随着含水量增加,黄土古土壤从潮湿状态变为近饱和状态,原状土样和扰动土样的强度降低幅度都很大。原状土样的黏聚力降低幅度大于扰动土样,扰动黄土古土壤主要以黏粒的胶结为主,土体中的毛细水引起表面张力增加其连接强度,因此强度降低幅度较小。原状土样的原始黏结力主要与土的密实度相关,加固黏结力与土粒的矿物成分、形成条件和胶结物质的性质有关。当原状土样所处的环境和条件改变时,如压力或湿度增减和盐分溶滤时,其值将会减小或完全消失。

2.4 拟合公式

利用库伦公式,对黄土古土壤抗剪强度随含水量和干密度的变化关系进行数学公式拟合。图 5—6 给出了扰动土样在不同干密度条件下黏聚力、内摩擦角随含水量的变化曲线图。

扰动土样在干密度相同的条件下,黏聚力随着含水量的增大而减小。可以看出干密度越小,黏聚力随含水量增加降低的趋势越明显。在同一干密度水平

下,黏聚力与含水量呈指数函数关系。黏聚力随含水量,干密度的变化公式:

$$c = 2.13e^{3.8\rho_d - (0.21\rho_d^2 - 0.3\rho_d + 0.09)\omega} \quad (1)$$

式中: c ——黏聚力 (kPa); ρ_d ——土的干密度 (g/cm^3); ω ——土的含水量 (%)。下同。

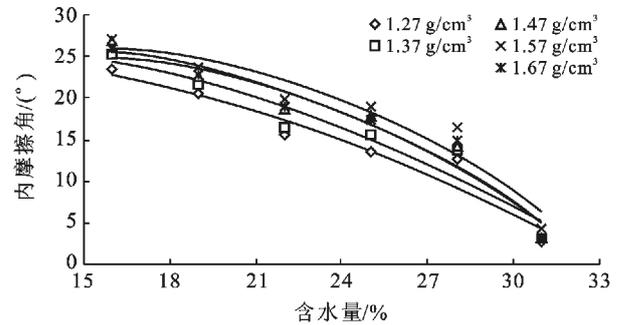


图 5 内摩擦角随含水量的变化关系

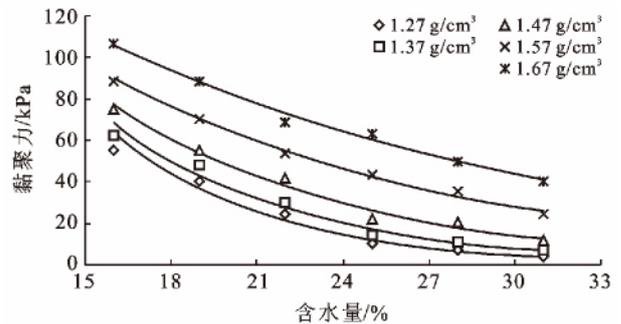


图 6 黏聚力随含水量的变化关系

从图 5—6 中可以看出,内摩擦角随干密度的变化主要集中在一个区域内,变化并不大。在干密度确定的条件下,内摩擦角随含水量的增大而减小,其呈现二次多项式的关系:

$$\varphi = -0.06\omega^2 + 1.5\omega + 16.1 \quad (2)$$

式中: φ ——土的内摩擦角 (°)。下同。

将数学拟合得到的抗剪强度参数 c, φ 随含水量变化的公式代入土的摩尔—库仑抗剪强度表达式即:

$$\tau = 2.13e^{3.8\rho_d - (0.21\rho_d^2 - 0.3\rho_d + 0.09)\omega} + \sigma \text{tg}(-0.06\omega^2 + 1.5\omega + 16.1) \quad (3)$$

式中: τ ——土的抗剪强度 (kPa)。下同。

采用式 (3) 对不同正应力作用下不同干密度的黄土古土壤在不同含水量下的抗剪强度进行计算,用相对误差公式:

$$|e_r| = \left| \frac{x^* - x}{x^*} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中: x^* ——实测值; x ——计算值,计算出二者的相对误差。计算抗剪强度值与实测抗剪强度值的相对误差均在 10% 以下,所以采用该拟合公式计算不同含水量,不同干密度黄土古土壤的抗剪强度是合理

的。需要说明的是,土样取自关中平原中南部的第一层古土壤,因此该式具有其特殊性。但抗剪强度随含水量和干密度的表达形式是固定的,含水量和干密度只需进行简单的物理性质测试就可得到。

3 结论

(1) 黄土古土壤抗剪强度指标 c, φ 随着含水量的增大而减小,黏聚力随含水量的增加降低的幅度较大。

(2) 黄土古土壤的黏聚力随干密度的增大而增大,在含水量较大的情况下,黏聚力随干密度增大的幅度较大。内摩擦角随干密度的增大表现出先增大后减小的趋势,且变化区间较小。

(3) 在相同干密度条件下原状土样的黏聚力、内摩擦角均大于扰动土样。原状土样和扰动土样的黏聚力、内摩擦角均随含水量的增大而减小,原状土样的黏聚力随含水量递减的趋势大于扰动土样。

(4) 利用库伦公式,揭示出黄土古土壤的抗剪强度指标黏聚力随含水量的变化呈指数函数关系,内摩擦角与含水量呈二次多项式的关系。得到关中平原中南部的第一层黄土古土壤随含水量和干密度变化的抗剪强度公式。

[参 考 文 献]

[1] 岳应利. 黄土高原西部黄土工程物理性质及其成因[J].

中国沙漠,2004,24(6):680-684.

- [2] 雷祥义,屈红军,岳乐平. 灞河阶地黄土—古土壤系列及其年代意义[J]. 西北大学学报,1992,22(2):219-225.
- [3] 赵景波,邵天杰,牛俊杰. 西安白鹿塬黄土渗透性与含水条件[J]. 地理研究,2009,28(5):1189-1190.
- [4] 张宁宁,骆亚生,沙磊. 含水率对非饱和原状黄土强度的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(5):101-104.
- [5] 骆亚生,谢定义,邵生俊,等. 非饱和黄土的结构变化特性[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(8):114-118.
- [6] 党进谦,李靖. 含水量对非饱和黄土强度的影响[J]. 西北农业大学学报,1996,24(1):57-60.
- [7] 党进谦. 非饱和黄土的结构强度及其作用[J]. 西北农业大学学报,1998,25(6):48-51.
- [8] 张文毅,党进谦,朱彭涛,等. 重塑黄土强度试验研究[J]. 水电能源科学,2011,53(5):53-56.
- [9] 李保雄,苗天德. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):1003-1008.
- [10] 雷胜友,李志远,王吉庆,等. 含水量对非饱和黄土强度的影响[J]. 交通运输工程学报,2012,12(1):1-5.
- [11] 张茂花,谢永利,刘保健. 增湿时黄土的抗剪强度特性分析[J]. 岩土力学,2006,27(7):1195-1200.
- [12] 刘宏泰,张爱军,段涛,等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报,2010(4):38-40.
- [13] 张文毅,党进谦,朱彭涛,等. 重塑黄土强度试验研究[J]. 水电能源科学,2011,29(5):53-56.

(上接第 318 页)

[参 考 文 献]

- [1] 贾劝宝. 陇东的“渗坑”与“涝池”[J]. 水利天地,2010(2):28-29.
- [2] 刘照生,刘志荣. 旧式涝池的改造与利用[J]. 小城镇建设,1992(3):19.
- [3] 杨光,丁国栋,屈志强. 中国水土保持发展综述[J]. 北京林业大学学报:社会科学版,2006,5(S1):72-77.
- [4] 黄占斌,程积民,赵世伟,等. 半干旱地区集雨利用模式及其评价[J]. 农业工程学报,2004,20(2):301-304.
- [5] 陈爱侠,于法稳. 黄土高原半干旱区雨水集蓄利用研究[J]. 生态经济,2002(12):47-49.
- [6] 长武县志编纂委员会. 长武县志[M]. 西安:陕西人民出版社,2000.
- [7] 周玉娟. 长武县农村安全饮水的现状与对策[J]. 吉林农业,2011(7):18-19.
- [8] 杨三君. 防止水窖涝池渗漏和淤积的有效办法[J]. 陕西农业科学,1960(7):315.
- [9] 张盼,刘文兆. 应用时间序列模型分析长武塬区地下水水位的变化特征[J]. 水土保持研究,2010,17(3):22-27.
- [10] 王锐. 基于环境同位素的黄土塬区降水—土壤水—地下水转换关系研究[D]. 陕西 杨凌:中国科学院、教育部水土保持与生态环境研究中心,2007.
- [11] 程立平,刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报,2011,27(9):203-207.
- [12] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报,1983,3(2):91-101.
- [13] 王锐,刘文兆,赵小鹏. 长武塬区地下水动态特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):48-52.